

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04699

研究課題名(和文) 極域における風波の発生・発達機構の解明およびそのバルク式の定式化

研究課題名(英文) Elucidation of generation and development mechanism of wind-wave in polar region and formulation of its bulk equation

研究代表者

小笠原 敏記 (Ogasawara, Toshinori)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：60374865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気液温度勾配の風浪場を設定することが可能な風洞水槽を用いて、気液温度勾配が風波の発達特性にどのような影響を及ぼすのか、また、その影響を及ぼす物理的原因を考察したところ、以下の結論を得た。

1) 水温に比べて気温が低くなるほど、波高が大きくなる傾向となる。また、この傾向は風速が弱い条件ほど顕著に表れることを明らかにした。2) 波高が大きくなる原因として、水面温度が低下し水面の動粘性係数が大きくなることにより、風から水面に輸送される運動量が大きくなることを推察した。3) 風速が大きくなり水面変動が発達すると、運動量輸送に影響を与える要因が水面の動粘性係数から形状抵抗に変化することを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、気候変動シミュレーションにおいて十分に検討されていない極域における気液境界層のモデル化の基になる貴重なデータを取得することができた。特に、気液温度勾配下における風波の波浪特性を明らかにし、気温の影響を受けた気液双方の動粘性係数の変化が波の発達に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。このような事実は、観測データの乏しい極域における風波の発生・発達率の精度を高めることを可能とし、地球規模における気候変動の予測精度の向上に結びつく成果と言える。

研究成果の概要(英文)：This study aims to identify characteristics of wind waves with an air-liquid temperature gradient. The following conclusions were reached in this study.

1) The lower the air temperature relative to the water temperature, the greater the wave height will tend to be. 2) The cause of the more significant wave height is inferred to be the increase in momentum transported from the wind to the water surface due to the decrease in water surface temperature and the increase in the kinematic viscosity of the water surface. 3) When the wind speed increases and the water surface variability develops, the factors that affect momentum transport are the factors that affect the water surface kinematic viscosity and the water surface momentum transport. 3) As wind velocity increases and water surface variability develops, the factor influencing momentum transport changes from the kinematic viscosity of the water surface to waves drag.

研究分野：海岸工学

キーワード：風波 極域 気液温度勾配

## 1. 研究開始当初の背景

温暖化が進行し海水温が上昇すれば、北極では海水の融解が加速され、無氷水面の海域が増加するだけでなく、海水温度の上昇を引き起こす。その結果、大気と海洋の境界層では鉛直温度勾配の変化が生じるため、同風速条件下であっても大気が不安定な場合、波高が10~20%大きくなることが観測で明らかにされている。これまでの風洞水槽の実験により、水温よりも気温が低いような条件下の不安定成層で発生する風波は、中立成層に比べて、風波の発生が早くなることを明らかにしている。

本研究では、極域のような温度成層の場を設定することが可能な風洞水槽を用いた実験を行い、風波の発生・発達機構と安定、不安定および中立成層のような温度成層との関係を明らかにする。さらに、極域にも適応可能な海面抵抗係数  $C_D$  によるバルク式を海面応力として与えた粒子法による数値水槽を開発し、観測データの乏しい極域における風波の発生・発達率の予測精度を高めるバルク式の確立を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、極域のような温度成層の場を設定することが可能な冷凍室内の風洞水槽を用いて、多様な成層条件下での実験を行い、温度成層が波の時間的発達率、摩擦速度  $u_*$  および海面粗度  $z_0$  に与える影響を明らかにする。さらに、代表風速  $U_{10}$  で定義した海面抵抗係数  $C_D$  の定式化を行い、その抵抗係数を組み込んだ数値水槽の開発を行うことである。研究期間内に実施する研究目標は以下の4つである。

- (1) 極域での温度成層が波の発生・発達率に及ぼす影響の解明
- (2) 風波と摩擦速度  $u_*$  および海面粗度  $z_0$  との関係の検証
- (3) 多様な温度成層における海面抵抗係数  $C_D$  の定式化
- (4) 海面抵抗係数  $C_D$  によるバルク式を考慮した数値水槽の開発

これらの目標を踏まえ、極域における風波の発生・発達機構を解明し、温度成層の条件に適応したバルク式を提案する。また、海面抵抗係数で表されるバルク式を組み込んだ数値水槽を開発することによって、極域で起こり得る波浪推算への適用を行う。さらに、極域での海水面の拡大および鉛直温度勾配の変化は、これまでに経験のないような暴波浪が発生することが考えられることから、多様な温度成層と風波の発生・発達機構の関係を解明することを課題とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、極域のような温度成層の場を設定することができる風洞水槽を用いることにより、風波の発生・発達機構の解明を行い、数値水槽により提案するバルク式の妥当性を検証することが目的である。以下のように研究を進めていく。

- (a) 安定、不安定および中立成層のような温度成層の状態を設定するためには、各成層状態における鉛直温度勾配を明らかにする必要がある。そこで、静水面を基準として気体側と液体側に複数の温度プローブを鉛直方向に配置して気温と水温を計測する。これによって、鉛直温度勾配の場が正しく設定されていることを確認する。
- (b) 風波の発生・発達と風速との関係を明らかにするためには、正確な風速データを得ることが必要である。そこで、熱線式風速計を用いて水面鉛直上方で定点計測を行うと共に、PIV (Particle Image Velocimetry) 計測を用いて水面近傍を面的に計測する。これより、モニン・オブコフの相似則に従い風速の鉛直分布を求め、そこから得られる摩擦速度  $u_*$  と代表風速  $U_{10}$  との関係より、温度成層を考慮した海面抵抗係数  $C_D$  を求める。
- (c) 風波の時間的発達過程を明らかにするためには、水面変位の情報を得ることが必要である。そこで、PIV 計測範囲と同位置で同期させた容量式波高計を用いて計測し、風波発生・発達機構の解明に重要な有義波高、発生確率分布および周波数スペクトルを求める。
- (d) 本実験データが海洋観測データと包括的に整理できるようにするため、鈴木ら (2010) が提案した有義波高と有義波周期で表される風波飽和度を参考に、海面抵抗係数と風波飽和度の関係を定量的に評価し、極域にも適応可能なバルク式の確立を図る。

実験に用いた水槽は、冷房室に設置され、風洞を含めて長さが17.0m、幅が0.5m、高さが1.5mである。底面と側面に取り外し可能な断熱材を設置し、水面以外からの外気の熱は遮断される。水深は0.80mと一定である。水位の時間変化は、風洞入口から9.75mの距離に配置された波高計によって計測する。水面上の水粒子速度は、粒子画像速度測定 (PIV) システムを使用して、二次元速度場を求める。図1は、水槽および計測機器の概要を示す。風速は、低・中・高の3段階に区分し、 $U_{10}$  (水面から高さ10cmでの風速) = 2.8~3.2 m/s を低風速、 $U_{10}$  = 5.8~6.4 m/s を中風

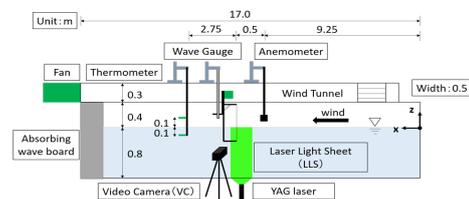


図1：実験水槽の概要

速,  $U_{10}=7.7\sim 8.3\text{ m/s}$  を高風速と定義した. 空気温度  $T_a$  と水温  $T_w$  の温度差  $\Delta T (=T_a - T_w)$  は, 各風速で設定される. 温度差に応じて, 中立成層 ( $|\Delta T| < 3^\circ\text{C}$ ), 遷移成層 ( $-3^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq -6^\circ\text{C}$ ) および不安定成層 ( $\Delta T < -6^\circ\text{C}$ ) の条件を設定した. 表1は, 各成層での実験条件を示す.

#### 4. 研究成果

図2は, 空気と水の温度差  $\Delta T$  が減少するにつれて波高が増加することを示している. 不安成層では, 中立成層と比較して, 波高が1.5倍から3倍に増加することが確認できる. さらに, 図3は波高の確率分布密度である. 中立成層に比べ, 不安成層では確率密度が高くなる波高が約40%増加し, 全体の密度分布も大きくなる傾向を示していることがわかる. これらの結果は, 同じ風速の条件で波高が中立成層よりも不安定成層では10~20%程度も大きくなることを示した Kahma・Calkoen (1992) の結果と同様な傾向を示し, 水よりも空気の温度が低い状態でも生じる現象であることを実証している.

空気温度が水温よりも低い場合, 空気と水の摩擦が増加し, 波の高さが増すと考えられる. この現象は, 空気と水の動粘性係数の差異に起因している. 空気温度が低下すると, 空気の動粘性係数  $\nu_a$  が減少し, 水の動粘性係数  $\nu_w$  が増加する. そのため, 同じ風速の場合, 空気温度が低くなるほど風から水面への運動量が増加する. 空気と水の温度が同じ ( $T_a = T_w$ ) 場合, 風から水面への運動量が小さくなり, 波高が小さくなる. 一方, 空気の温度は低く水温が高い ( $T_a < T_w$ ) 場合, 空気の動粘性係数  $\nu_a$  が低下し, 風から水面への運動量が増加して, 波高が大きくなる. したがって, 空気と水の動粘性係数  $\nu_w$  の差異が波高の増加の原因であると考えられる.

図3は, 風速  $U_{10}$  と海面抵抗係数  $C_D$  の関係であり, 既存の経験式と実験値を比較したものである. いずれの風速においても, 既存の経験式とオーダー的に概ね一致しているが, 気液温度差の影響によるばらつきが確認される. つまり, 海面抵抗係数をモデル化する上で, 風速だけでなく, 気液温度差の影響も考慮したモデル化が必要であると推察される.

図4は, 無次元動粘性係数  $(\nu_w / \nu_a)^2$  と海面抵抗係数  $C_D$  の関係を示す. 無次元動粘性係数が増加すると, 海面抵抗係数もやや大きくなる傾向を表している. また, 中立成層では,  $(\nu_w / \nu_a)^2 = 0.004$  の付近に多く分布しているが,  $(\nu_w / \nu_a)^2 > 0.01$  になると, 不安定成層の値のみが分布していることがわかる. しかし, 中立成層と不安定成層の境界は不明確であるため, 更なる実験条件の整理を行い, このような結果が得られた根拠となる要因を解明することが求められる.

最後に, 本研究では風波の波浪特性に及ぼす気液温度差の影響を解明するため, 風洞水槽を用いた実験を行い, 海面抵抗係数の新たな計算式を提案した. 結果として, 気温が低くなると波高が大きくなる傾向があり, 気液温度差と海面抵抗係数には相関があることが明らかになった. しかしながら, 今後の課題としては, 気温と水温のどちらが波高増大に強い影響を与えるかの検証や, 強風下の海面抵抗係数の解析が必要である. また, 海洋表層の温度分布が風波に及ぼす影響を考慮する上で, 気液温度差に注目することが重要であると考えられる.

表1: 各成層における実験条件

Case	$U_r$ (m/s)	$T_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta T$ ( $^\circ\text{C}$ )	Stratification
1	3	13.0	10.6	2.4	Neutral
2	3	4.9	9.8	-4.9	Transition
3	3	1.0	10.0	-9.0	Unstable
4	6	10.2	9.7	0.5	Neutral
5	6	5.5	10.3	-4.8	Transition
6	6	2.2	10.6	-8.4	Unstable

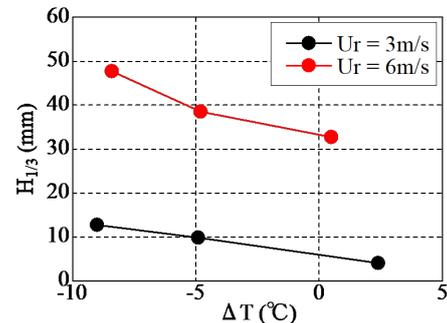


図2: 気液温度差  $\Delta T$  と有意波高  $H_{1/3}$  の関係

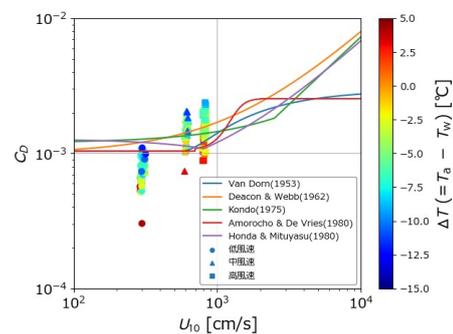


図3: 各気液温度差  $\Delta T$  における風速  $U_{10}$  と海面抵抗係数  $C_D$  の関係

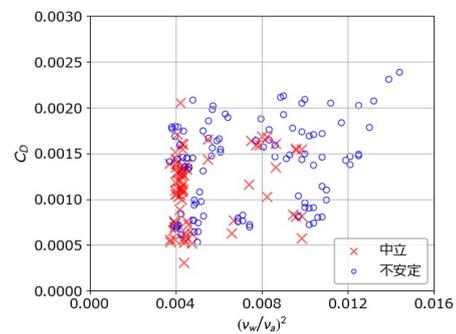


図4: 無次元動粘性係数  $(\nu_w / \nu_a)^2$  と海面抵抗係数  $C_D$  の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Akari Ueno
2. 発表標題 Applicability of Convolutional Neural Networks for Gas-Fluid Boundary Surface Detection of Wind Waves
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 You Otobe
2. 発表標題 Causes of pressure instability problem in Explicit-MPS and its improvement method
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------